

УДК 556.3

Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2016. Вып. 3

*Р. А. Филин^{1,2}, А. А. Потапов¹, Ф. Г. Атрощенко³, М. Е. Макушенко^{1,4}***ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ОТКАЧЕК В СЛОИСТЫХ ТОЛЩАХ
(на примере Архангельской алмазоносной провинции)**¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9² ООО «Геологический центр СПбГУ», Российская Федерация,
198854, Петергоф, Ульяновская ул., 1, литера А³ ООО «Геостройпроект», Российская Федерация,
199106, Санкт-Петербург, 22-я линия В. О., 3, корп. 4, пом. 10н⁴ Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева Российской академии наук,
Санкт-Петербургское отделение, Российская Федерация,
199004, Санкт-Петербург, Средний пр., В. О., 41, оф. 519

В 1997–2004 гг. на стадии разведки месторождения алмазов им. В. Гриба (Верхотинское месторождение, входящее в состав Архангельской алмазоносной провинции) проведены масштабные исследования, направленные на изучение гидрогеологических условий в районе и обоснование изменения гидродинамической ситуации при промышленном освоении алмазоносной трубки.

В представленной статье описаны гидрогеологические условия района месторождения и приведены основные результаты выполненных в указанный период опытно-фильтрационных работ. Библиогр. 10 назв. Ил. 7. Табл. 1.

Ключевые слова: месторождение алмазов, гидрогеологический разрез, откачка, гидрогеологические параметры.

*R. A. Filin^{1,2}, A. A. Potapov¹, F. G. Atroschenko³, M. E. Makushenko^{1,4}***EXPERIMENTAL PUMPING TESTS IN MULTILAYER AQUIFERS
(Arkhangelsk diamond province)**¹ Saint Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation² Saint Petersburg State University Centre for Geology LLC,
1, litera A, Uliyanovskaya ul., Petergof, 198854, Russian Federation³ Geostroyproekt LLC, litera D, 22 liniya, Vasilievskiy ostrov, St. Petersburg, 199106, Russian Federation⁴ Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS,
St. Petersburg Branch, of. 519, 41, Sredniy pr., Vasilievskiy ostrov, St. Petersburg, 199004,
Russian Federation

From 1997 to 2004, at the stage of geological prospecting of the V. Grib diamond deposit (Verkhotina deposit, part of the Arkhangelsk diamond province), extensive investigations were conducted aimed at studying the hydrogeological conditions in this region and assessing changes in the hydrodynamic situation during the exploration of the diamond pipe.

The article deals with the hydrogeological conditions of the deposit area and the main results of experimental-filtration works performed in the deposit during this period. Refs 10. Figs 7. Table 1.

Keywords: diamond deposit, hydrogeological cross section, pumping test, hydrogeological parameters.

Общие сведения о месторождении

Месторождение алмазов им. В. Гриба расположено в западной части Мезенского района Архангельской области, в 115 км к северо-востоку от Архангельска

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2016

и в 25–30 км к северо-востоку от другого крупного месторождения алмазов — месторождения им. М. В. Ломоносова [1]. Месторождение им. В. Гриба находится в центральной части Беломорско-Кулойского плато, приподнятого над уровнем моря в районе месторождения на 105–110 м [2]. Общие геолого-гидрогеологические условия Архангельской алмазонасной провинции достаточно подробно изложены в работах [3, 4]. В нашей статье мы ограничимся лишь кратким описанием гидрогеологических условий в районе трубки им. В. Гриба.

Гидрогеологический разрез *дочетвертичных отложений* общей мощностью более 1 км (рис. 1) в районе месторождения представляет сложную систему тесно связанных между собой, а также с поверхностными водотоками водоносных горизонтов и комплексов, осложненную в плане наличием трубок взрыва.

Водоносный горизонт среднекаменноугольных отложений олмуго-окуневской свиты (C₂ ol-ok) распространен на междуречных пространствах на всей территории, прилегающей к месторождению. Сверху перекрывается четвертичными отложениями (Q). Водовмещающие породы в районе месторождения представлены трещиноватыми доломитами и известняками. Толща в верхней части закарстована, нередко выветрена до карбонатной муки. Мощность отложений за пределами месторождения достигает 90 м, но на месторождении не превышает 19–24 м. Воды преимущественно безнапорные. Глубина залегания уровня подземных вод на месторождении изменяется от 16 до 26 м. Воды горизонта — гидрокарбонатные магниевые-кальциевые. Величина сухого остатка составляет 120–300 мг/дм³, рН вод 8,0–8,5. Горизонт откачками в пределах месторождения отдельно не опробовался. В отдельных скважинах, пройденных на водоносный горизонт олмуго-окуневских отложений, были проведены одиночные кратковременные наливывы.

Питание горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и перетока из смежных водоносных горизонтов и комплексов. Разгрузка горизонта почти полностью осуществляется в гидрографическую сеть (р. Кукомка, оз. Черное, протока Черная и др.) в виде родников. Дебиты родников в районе месторождения изменяются от 0,5 до 19 л/с.

Урзугский (урзугско-воереченский) водоносный горизонт (C₂ ur-vr) широко распространен на территории месторождения. Перекрывается карбонатными породами, а также отложениями валдайской морены, а залегает на отложениях падунской свиты венда и на кратерных образованиях трубок взрыва. Литологически горизонт представлен песчаниками (урзугская свита) с редкими прослоями и линзами аргиллитов, алевролитов (воереченская свита). В районе месторождения мощность отложений горизонта достигает 41 м, но преобладает — 30–35 м. Наличие в кровле слабопроницаемой толщи воереченских отложений (обычно мощностью 4–6 м) обуславливает в целом затрудненную гидравлическую связь между данным комплексом и вышележащими отложениями. Глубина уровня подземных вод на месторождении изменяется от 15 до 27 м. Дебиты откачек из скважин в пределах месторождения составили 0,76–0,95 л/с с понижениями в первые метры. Питание водоносного горизонта осуществляется за счет перетекания из смежных водоносных горизонтов и комплексов, разгрузка — в местную речную сеть в виде родников и пластовых выходов. Воды горизонта — гидрокарбонатные магниевые-кальциевые, пресные: величина сухого остатка составляет 100–220 мг/дм³, рН — 7,5–8,4.

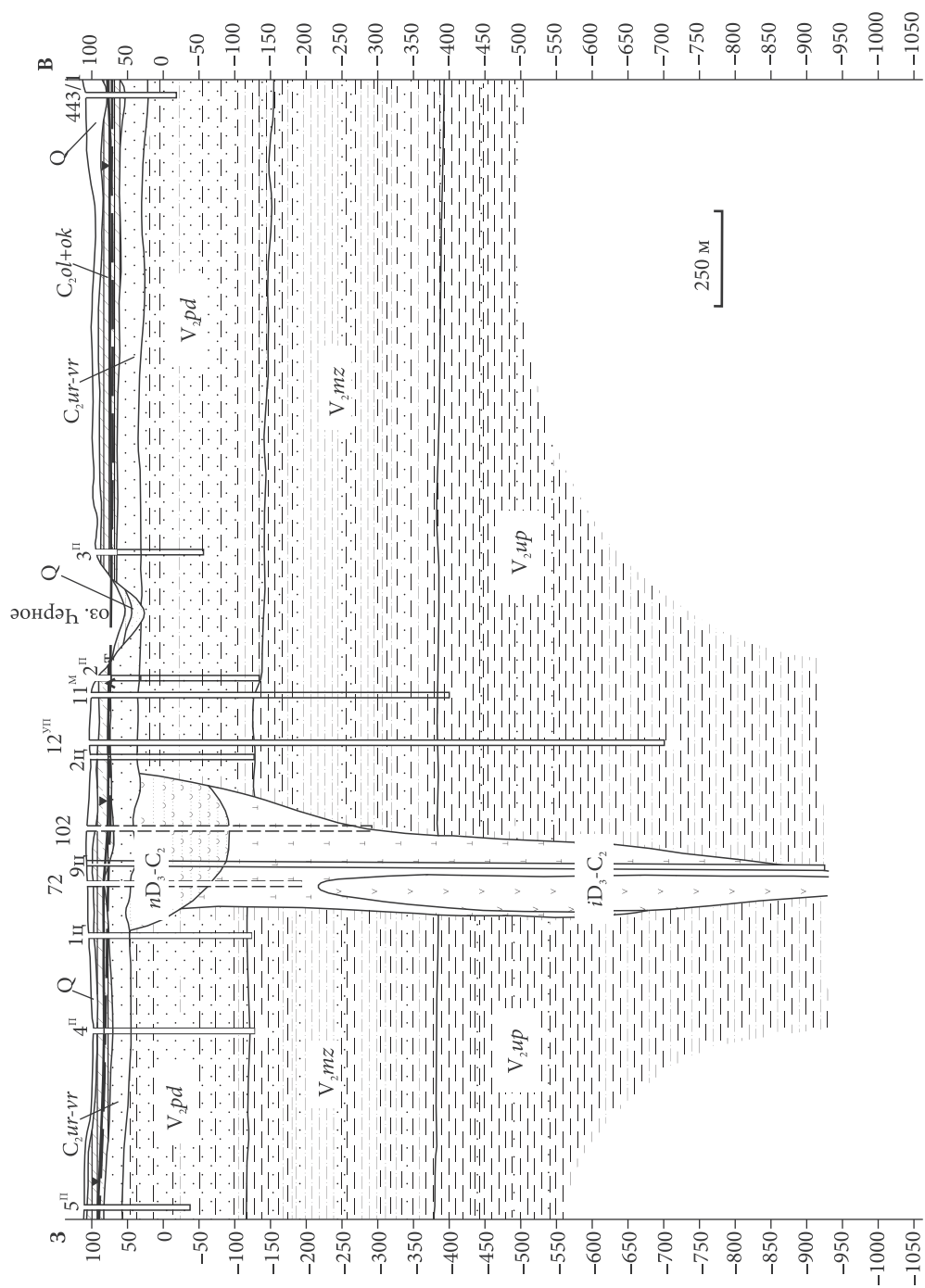


Рис. 1. Схематический гидрогеологический разрез месторождения им. В. Гриба (показан уровень п/в в падунском водоносном комплексе)

Воды кратерной и жерловой фаций трубок взрыва ($n, i D_3-C_2$) связаны с туфогенно-осадочной толщей кратерной фации и менее водообильными ксенотуфобрекчиями и кимберлитами жерловой фации. Максимальная мощность туфогенно-осадочной толщи составляет около 135–140 м, в среднем 100–110 м. Воды напорные. По данным откачки из одной из скважин на месторождении получены следующие параметры: расход — 12,3 л/с, максимальное понижение — 8,6 м. По сухому остатку воды комплекса являются пресными с разбросом значений от 150 до 250 мг/дм³, гидрокарбонатные магниевые-кальциевые, рН около 8,0, что в целом соответствует составу и минерализации вод вмещающих пород. Породы жерловой фации залегают ниже по разрезу, вмещающими по отношению к ней являются отложения усть-пинезской и мезенской свит верхнего венда. Мощность жерловой фации составляет несколько сот метров (более 830 м). Глубина залегания уровня подземных вод — порядка 25–30 м. При откачке из интервала глубин 250–530 м (2004 г.) понижение составило 25,72 м при расходе 1,9 л/с, а при откачке из интервала 500–819 м — 25,5 м при расходе 0,64 л/с. Сухой остаток вод данных отложений составляет от 5 до 16 г/дм³. Воды хлоридные и сульфатно-хлоридные натриевые, рН около 7,0.

Падунский водоносный комплекс (V_2pd), распространенный на всей территории месторождения, перекрывается обычно отложениями урзутской свиты, на отдельных участках — четвертичными образованиями. Водовмещающие породы представлены мелко- и среднезернистыми песчаниками с прослоями алевролитов и аргиллитов. Мощность комплекса в пределах месторождения не превышает 160–170 м. Уровни подземных вод фиксируются на глубинах 22,5–30,0 м. Воды напорные. При проведении откачек расход изменялся от 15 до 25 л/с при понижении — от 7 до 12,5 м. Воды комплекса преимущественно пресные (сухой остаток — 100–200 мг/дм³), гидрокарбонатные магниевые-кальциевые или натриево-кальциевые, рН — 7,5–8,5. В локальных зонах в нижних частях комплекса, где имеет место перетекание из нижележащих комплексов в падунский, — воды хлоридные или гидрокарбонатно-хлоридные, солоноватые с сухим остатком в несколько граммов в кубическом дециметре. Питание комплекса осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, а также из вышележащих и частично нижележащих водоносных горизонтов и комплексов. Разгрузка происходит в местную гидрографическую сеть субаквально (р. Падун, Кепина, Золотица), основная же часть потока направлена к региональным дренам, находящимся к востоку от месторождения.

Мезенский слабоводоносный комплекс (V_2mz) перекрыт отложениями падунской свиты, а подстилается терригенной толщей усть-пинезской свиты. Водовмещающие породы представлены тонким переслаиванием алевролитов, аргиллитов и песчаников, с преобладанием глинистой составляющей в разрезе. Мощность комплекса в среднем составляет 250 м. Уровень подземных вод находится на глубине 21–27 м. Воды высоконапорные. Отложения комплекса опробовались кустовой откачкой, проведенной с дебитом 2,9 л/с при понижении 23,54 м. Воды комплекса солоноватые и соленые (величина сухого остатка — 4,0–15,0 г/дм³), хлоридные и сульфатно-хлоридные натриевые, рН 6,7–7,5. Область питания комплекса за счет атмосферных осадков находится на северо-западе от месторождения, где он залегает непосредственно под маломощным четвертичным чехлом. На остальной территории питания осуществляется за счет перетекания из смежных водоносных горизонтов.

Усть-пинежский слабоводоносный комплекс (V_2 ир) в связи с большой глубиной залегания изучен слабо. В пределах месторождения комплекс вскрыт лишь тремя скважинами. Максимально вскрытая мощность достигает 550 м. Воды высоконапорные. Уровень воды в единственной гидрогеологической скважине находится на глубине 21,5 м. В пределах месторождения комплекс откачками не опробовался. Лишь в 2004 г. был проведен одиночный опытный налив в скважину 12^{УП} (см. рис. 1), вскрывающую отложения усть-пинежского комплекса. На сопредельных участках при опробовании был получен дебит 0,92 л/с при понижении уровня воды 53,77 м. Воды комплекса соленые с величиной сухого остатка до 20–25 г/дм³, хлоридные или сульфатно-хлоридные натриевые. Усть-пинежский комплекс можно считать региональным относительным водоупором для верхней части гидрогеологического разреза.

Характеристика и результаты ОФР

Основной задачей при опытно-фильтрационных работах (ОФР) являлось определение фильтрационных параметров всех водоносных горизонтов и комплексов как потенциальных источников обводнения будущих горных выработок, их связи между собой (учитывая слоистый характер гидрогеологического разреза, в котором в верхней — наиболее проницаемой — части отсутствуют водоупорные отложения), с рудным телом и прилегающими к трубке поверхностными водотоками.

Для проведения ОФР на месторождении были пробурены 40 гидрогеологических скважин [2]. С учетом того, что наиболее водообильным водоносным комплексом является падунский, большинство скважин было пробурено именно на него и смежные с ним горизонты. Скважины располагались линейно: по нескольким лучам на расстоянии 0,2–1,5–2,0 км от центра трубки (см. рис. 1). Поскольку одной из задач являлось определение взаимосвязи горизонтов (т. е. количественная оценка вертикального коэффициента фильтрации), то скважины на верхнюю часть гидрогеологического разреза: олмуго-окуневский, урзугский горизонты и падунский комплекс располагались в кустах (по три скважины в кусте). Кроме того, были пробурены несколько кустов по две скважины: на олмуго-окуневский и урзугский горизонты.

За период работ проведены 3 групповые откачки, 8 кустовых откачек и более 20 одиночных опытов (включая пробные откачки и наливы). С разной степенью детальности были опробованы все водоносные горизонты и комплексы, выделенные в пределах месторождения.

Рассмотрим результаты нескольких откачек из наиболее водообильных горизонтов и комплексов: урзугского, падунского и кратерной фации трубки взрыва.

Кустовая откачка из скв. 107^А проводилась с целью изучения фильтрационных свойств урзугского водоносного горизонта и оценки взаимосвязи с вышележащим олмуго-окуневским водоносным горизонтом. В ходе откачки были опробованы водоносные горизонты верхней части гидрогеологического разреза: олмуго-окуневский и урзугско-воереченский. Общая продолжительность откачки составила 1 сут. Восстановление уровня прослеживалось в течение 0,75 сут. Расход в ходе ее проведения составил 82 м³/сут (0,95 л/с). В качестве наблюдательных использовались скважины 107^В и 107^Г на урзугский и олмуго-окуневский водоносные гори-

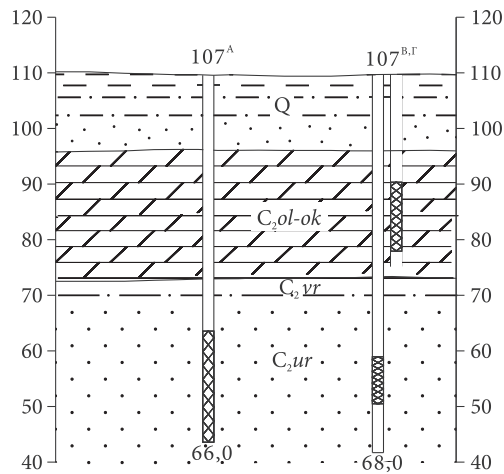


Рис. 2. Схематический геологический разрез по линии скважин опытного куста 107^A–107^{B,Г}

зонты соответственно (рис. 2). Максимальное понижение в скважине 107^B составило 0,51 м, скважина 107^Г на откачку не отреагировала, наблюдения за изменением уровня по центральной скважине не велись по техническим причинам. Расстояние от центральной до скважины 107^B — 15 м.

В качестве расчетной была использована *схема трехслойного пласта с постоянным уровнем в смежном горизонте*. Такой выбор в нашем случае оправдан, поскольку между олмуго-окуневскими и урзгскими слоями (в интервале глубин 37–40 м) залегает прослой слабопроницаемых воереченских отложений, представленных плотными глинистыми алевропесчаниками. Соответственно в качестве основного горизонта, из которого ведется откачка, принимается урзгский, смежного с ним, из которого происходит перетекание, — олмуго-окуневский, а слой, через который идет перетекание, — воереченские отложения.

Решение для такой системы в условиях неустановившегося движения подземных вод было получено М. Хантушем и Ч. Джейкобом [5, 6]:

$$S = \frac{Q}{4\pi T} W_n(u, r/B), \quad (1)$$

где $W_n(u, r/B)$ — специальная функция [7]; $B = \sqrt{Tb/k_0}$ — параметр перетекания, м; k_0 — коэффициент фильтрации разделяющего горизонта, м/сут; T — коэффициент водопроницаемости основного горизонта, м²/сут; r — расстояние до наблюдательной скважины, м; b — мощность разделяющего горизонта, м.

Обработка откачек здесь и далее осуществлялась с помощью программы AQUITEST [8], которая предназначена для определения фильтрационных параметров по данным полевых экспериментов в различных гидрогеологических условиях на основе существующих аналитических решений. Результаты обрабатывались с использованием графика временного прослеживания (рис. 3). По результатам подбора теоретической и реальной кривых были получены следующие фильтрационные параметры:

$$T_{\text{осн}} = 37 \text{ м}^2/\text{сут}, a^* = 1,2 \times 10^4 \text{ м}^2/\text{сут}, B = 55 \text{ м}.$$

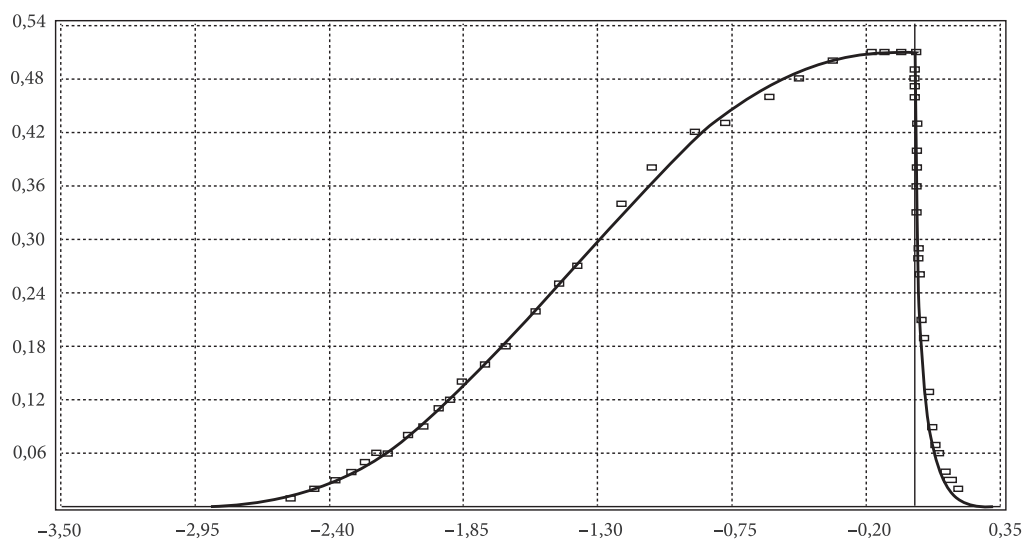


Рис. 3. График временного прослеживания $S\text{-}lg t$ понижения-восстановления уровня по наблюдательной скважине 107^в

Принимая мощность основного горизонта равной 27,5 м, а мощность воереченских отложений — 3 м, мы рассчитали значения коэффициента фильтрации (k_x), коэффициента упругой водоотдачи (μ^*) этого горизонта и коэффициента упругоёмкости η^* пород, слагающих этот горизонт, а также значение коэффициента фильтрации (k_z) для разделяющего слоя:

$$k_x = 1,34 \text{ м/сут}, \mu^* = 3,2 \times 10^{-3}, \eta^* = 1,16 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}, k_{z \text{ вт}} = 3,7 \times 10^{-2} \text{ м/сут}.$$

Кустовая откачка из скв. 72. Опробование проводилось с целью изучения фильтрационных свойств водоносных горизонтов рудного тела. Откачка велась в течение 2 сут. Восстановление уровня продолжалось в течение 1 сут. В качестве центральной использовалась скважина 72, которая вскрывает породы кратерной и жерловой фаций (см. рис. 1, рис. 4). Общая глубина скважины составляет 300 м. Скважина 76, глубина которой 320 м, являлась наблюдательной на тот же комплекс пород. Дебит в ходе проведения откачки составил 372 м³/сут (4,3 л/с). Максимальное понижение в центральной скважине — 72 — 10,13 м, в наблюдательной скважине 76 — 0,95 м. Расстояние между центральной скважиной и наблюдательной — 113 м.

Следует отметить, что и центральная, и наблюдательная скважины — не гидрогеологические, а разведочные. И в той, и в другой скважине фильтрующая часть представляет собой открытый ствол. Кроме того, обе скважины имеют достаточно большую глубину и вскрывают сразу два водоносных горизонта, различающихся фильтрационными характеристиками: водоносный горизонт, приуроченный к породам кратерной фации ($iD_3\text{-}C_2$), и водоносный горизонт жерловой фации трубки ($iD_3\text{-}C_2$). Но по косвенным данным (в частности, по результатам анализов химического состава проб подземных вод из обеих скважин) было установлено, что фактическая рабочая часть в центральной и наблюдательной скважинах располагается в пределах кратерной фации трубки. Нужно отметить, что перед началом откачки обе скважины были прокачаны в течение суток.

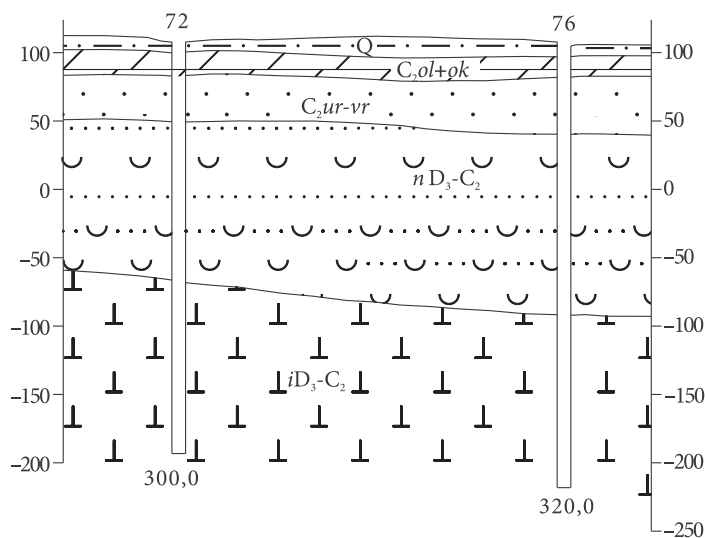


Рис. 4. Схематический геологический разрез по линии скважин опытного куста 72–76

В качестве расчетной схемы для интерпретации результатов мы принимаем схему линейного источника для анизотропного пласта [9]:

$$S = \frac{Q}{4\pi k_x l_\phi} P, \quad P = M \left(\chi^2 u, \frac{0,5 + \bar{z}}{\chi r} \right) + M \left(\chi^2 u, \frac{0,5 - \bar{z}}{\chi r} \right), \quad (2)$$

где $u = \frac{r^2}{4a_z^* t}$; $\bar{r} = \frac{r}{l_\phi}$; $\bar{z} = \frac{z}{l_\phi}$; $\chi = \sqrt{\frac{k_z}{k_x}}$ — параметр анизотропии; k_x — горизонтальный коэффициент фильтрации, м/сут; k_z — вертикальный коэффициент фильтрации, м/сут; l_ϕ — длина фильтра центральной скважины, м; r — расстояние по горизонтали между центральной и наблюдательной скважинами, м; a_z^* — коэффициент пьезопроводности в вертикальном направлении, м²/сут; z — расстояние по вертикали между центрами фильтра центральной и наблюдательной скважин, м.

Данная схема позволяет оценить фильтрационные свойства как вдоль напластования k_x , так и в вертикальном направлении k_z . Кроме того, в ней учитывается несовершенство центральной и наблюдательной скважин по степени вскрытия пласта. В данном случае в качестве основного горизонта, из которого ведется откачка, мы принимаем объединенный комплекс кратерной фации (средняя мощность 125 м) и урзугско-воереченского комплекса (средняя мощность 40 м). Для обработки результатов откачки по подошве (отметка +85 абс. м) водообильного олмуго-окуневского горизонта была также задана граница обеспеченного питания (I рода), исходя из того, что в силу большей водообильности уровень в нем не должен меняться в ходе откачки. А по подошве (отметка — 90 абс. м) кратерной фации задавали непроницаемую границу, отделяющую слабопроницаемые породы жерла от верхней части гидрогеологического разреза.

При интерпретации результатов откачки использовались графики временного прослеживания по наблюдательной скважине 76 (рис. 5, а) и по центральной скважине 72 (рис. 5, б).

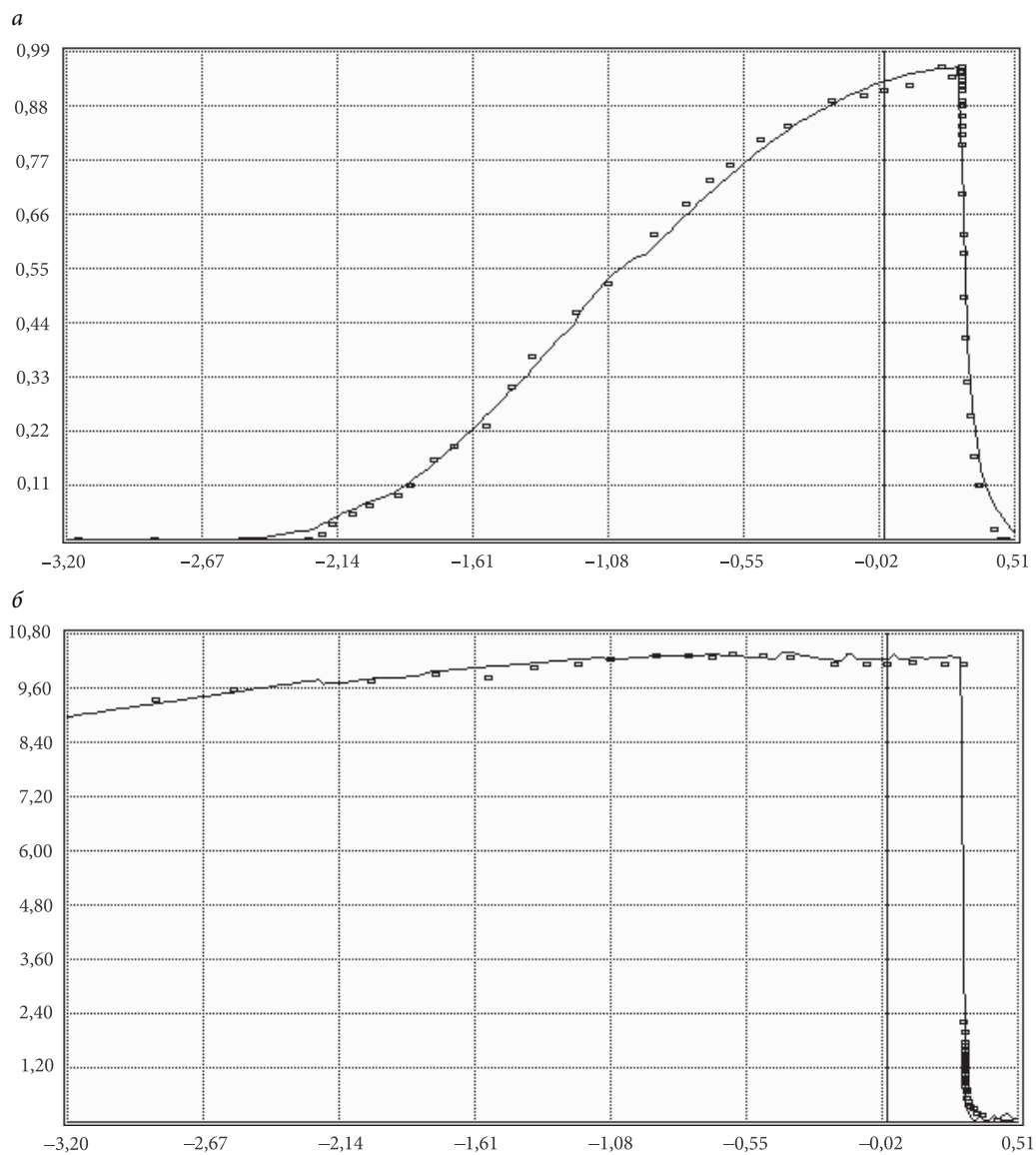


Рис. 5. График временного прослеживания $S\text{-}lgt$ понижения-восстановления уровня

а — по наблюдательной скважине 76; б — по центральной скважине 72.

По результатам обработки были подобраны фильтрационные параметры, характеризующие породы объединенного комплекса как вдоль (k_x), так и вкрест (k_z и a_z^*) напластования:

скв. 76: $k_x = 1,0$ м/сут, $k_z = 0,055$ м/сут, $a_z^* = 15\,000$ м²/сут;

скв. 72: $k_x = 1,16$ м/сут.

Параметры по центральной скважине подбирались при введении эффективного радиуса $r_{\text{эф}}$ скважины, который на два порядка отличается от реального — $5,6 \times 10^{-4}$ м.

Исходя из значений подобранных параметров и принимая среднюю мощность пласта равной 165,0 м, мы рассчитали коэффициент водопроницаемости T и коэффициент упругости η^* пород, слагающих объединенный комплекс:

$$\text{скв. 76: } T_{\text{очн.}} = k_x \times m = 165,0 \text{ м}^2/\text{сут}, \eta^* = k_z / a_z^* = 3,66 \times 10^{-6} \text{ м}^{-1};$$

$$\text{скв. 72: } T_{\text{очн.}} = k_x \times m = 191,4 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

Кустовая откачка из скв. 1ц. Проведение этой откачки предполагало изучение верхней части гидрогеологического разреза в пределах перекрывающих пород по западному лучу скважин (см. рис. 1, рис. 6). При этом предполагалось оценить фильтрационные свойства падунского водоносного комплекса (V_2pd), урзутского (C_2ur) водоносного горизонта, а также взаимосвязь последних с водообильным олмуго-окуневским горизонтом (C_2ol-ok).

В качестве центральной использовалась скважина 1ц, пробуренная на падунский водоносный комплекс. Общая глубина скважины составляет 230 м. Фильтр установлен «в разбежку» на верхнюю и среднюю части падунского горизонта. Таким образом, по степени вскрытия центральная скважина является несовершенной. В качестве наблюдательных использовались 6 скважин, оборудованных на разные водоносные горизонты: скв. 4^п и 5^п — на падунский (V_2pd) водоносный комплекс; скв. 4^у и 5^у — на урзутский (C_2ur) водоносный горизонт; скв. 4^о и 5^о — на олмуго-окуневский (C_2ol-ok) водоносный горизонт.

Откачка проводилась в течение 1,8 сут, а восстановление уровня — следующие 2,8 сут. Дебит откачки, по данным гидрогеологов Верхотинской партии, менялся в пределах от 1460 (16,9 л/с) до 1600 м³/сут (18,5 л/с). Максимальные понижения, достигнутые на конец откачки, составили: скв. 1ц — 8,36 м; скв. 4^п — 1,19 м; скв. 5^п — 0,18 м; скв. 4^у — 0,62 м; скв. 5^у — 0,19 м. Скважины 4^о и 5^о на откачку не отреагировали. Расстояние от центральной скважины до куста наблюдательных скважин 4^п–4^у–4^о составляло 266 м, до куста наблюдательных скважин 5^п–5^у–5^о — 758 м.

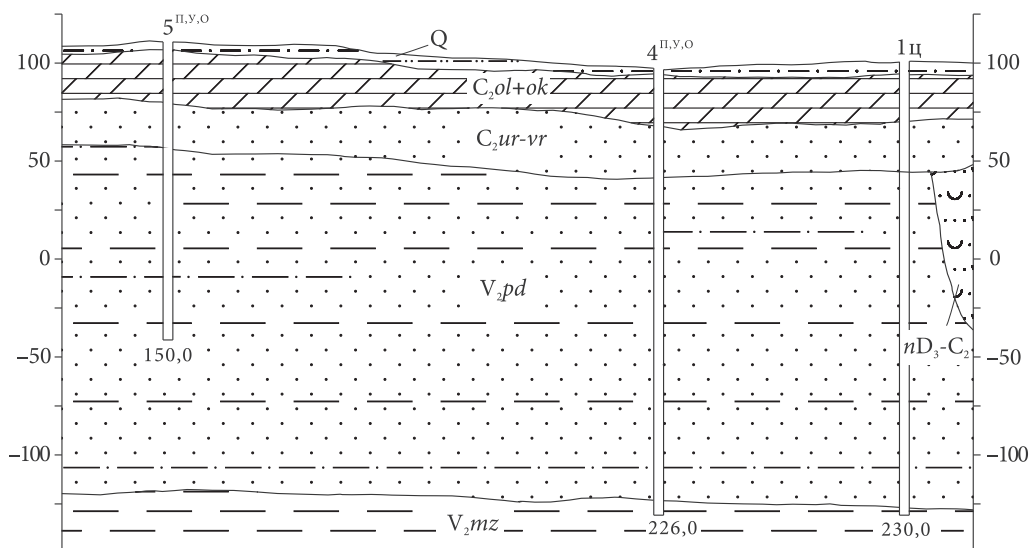


Рис. 6. Схематический геологический разрез по линии скважин опытного куста 1ц–4^п–5^п

Наблюдательная скважина 4^п оборудована фильтром на всю мощность падунских отложений, наблюдательная скважина 5^п — лишь на верхнюю часть падунского водоносного комплекса. Наблюдательные скважины 4^у и 5^у по степени вскрытия урзугского водоносного горизонта являются совершенными.

С учетом особенностей гидрогеологического разреза для обработки результатов была выбрана *схема трехслойного пласта с перетеканием с постоянным уровнем в смежном горизонте*. Теоретические предпосылки для изложены при описании откачки из скв. 107^А.

Схема, как уже говорилось выше, предполагает слоистое строение разреза. В качестве основного горизонта, из которого ведется откачка, принимаем объединенный урзугско-падунский комплекс (C_2 *ur-pd*). Такое объединение вполне оправданно, поскольку литологически горизонты схожи между собой. Кроме того, мощность урзугских отложений на этом участке колеблется «всего лишь» от 11 до 19 м (т. е. составляет менее 10 % мощности падунского комплекса). Следовательно, определяемые параметры будут относиться ко всей объединенной толще. За смежный горизонт, отличающийся большей водообильностью, примем водоносный горизонт, связанный с олмуго-окуневскими (C_2 *ol-ok*) отложениями, где уровень не меняется в процессе откачки. Как разделяющий пласт между ними, через который идет перетекание, принимаем слой, приуроченный к воереченским (C_2 *vr*) отложениям.

С помощью этой схемы были обработаны данные по всем наблюдательным скважинам (4^п, 4^у, 5^п, 5^у), при том что в течение откачки снижения уровня в олмуго-окуневском горизонте отмечено не было.

Обработка результатов осуществлялась на основании графиков временного прослеживания (рис. 7).

Получены следующие фильтрационные параметры:

$$\text{скв. 4}^{\text{п}}: T_{\text{оч}} = 185 \text{ м}^2/\text{сут}, a^* = 2,50 \times 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}, B = 590 \text{ м};$$

$$\text{скв. 4}^{\text{у}}: T_{\text{оч}} = 235 \text{ м}^2/\text{сут}, a^* = 1,25 \times 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}, B = 365 \text{ м};$$

$$\text{скв. 5}^{\text{п}}: T_{\text{оч}} = 185 \text{ м}^2/\text{сут}, a^* = 2,0 \times 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}, B = 430 \text{ м};$$

$$\text{скв. 5}^{\text{у}}: T_{\text{оч}} = 170 \text{ м}^2/\text{сут}, a^* = 2,15 \times 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}, B = 425 \text{ м};$$

При значениях средней мощности основного горизонта 186,0 м, а воереченских отложений — 12,7 м, мы рассчитали значения коэффициента фильтрации k_x , коэффициента упругой водоотдачи μ^* этого горизонта и коэффициента упругоёмкости η^* пород, слагающих этот горизонт, а также значение коэффициента фильтрации k_z для разделяющего слоя:

$$\begin{aligned} \text{скв. 4}^{\text{п}}: k_x = T_{\text{оч}}/m = 1,00 \text{ м/сут}, \mu^* = T_{\text{оч}}/a^* = 7,40 \times 10^{-4}, \eta^* = \mu^*/m = 4,14 \times 10^{-6} \text{ м}^{-1}, \\ k_{z \text{ vr}} = T_{\text{оч}} \times m_{\text{vr}}/B^2 = 0,67 \times 10^{-2} \text{ м/сут}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{скв. 4}^{\text{у}}: k_x = T_{\text{оч}}/m = 1,26 \text{ м/сут}, \mu^* = T_{\text{оч}}/a^* = 1,88 \times 10^{-3}, \eta^* = \mu^*/m = 1,01 \times 10^{-5} \text{ м}^{-1}, \\ k_{z \text{ vr}} = T_{\text{оч}} \times m_{\text{vr}}/B^2 = 2,56 \times 10^{-2} \text{ м/сут}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{скв. 5}^{\text{п}}: k_x = T_{\text{оч}}/m = 1,00 \text{ м/сут}, \mu^* = T_{\text{оч}}/a^* = 9,25 \times 10^{-4}, \eta^* = \mu^*/m = 8,41 \times 10^{-6} \text{ м}^{-1}, \\ k_{z \text{ vr}} = T_{\text{оч}} \times m_{\text{vr}}/B^2 = 1,27 \times 10^{-2} \text{ м/сут}; \end{aligned}$$

СКВ. 5^у: $k_x = T_{\text{оч}}/m = 0,91$ м/сут, $\mu^* = T_{\text{оч}}/a^* = 7,90 \times 10^{-4}$, $\eta^* = \mu^*/m = 7,22 \times 10^{-6} \text{ м}^{-1}$,
 $k_{z \text{ вр}} = T_{\text{оч}} \times m_{\text{вр}}/B^2 = 1,19 \times 10^{-2}$ м/сут.

Средние параметры для всех наблюдательных скважин (4^п, 4^у, 5^п, 5^у) имеют следующие значения:

$$T_{\text{оч}} = 194 \text{ м}^2/\text{сут}, a^* = 1,98 \times 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}, B = 452 \text{ м};$$

$$k_x = 1,04 \text{ м/сут}, \mu^* = 0,98 \times 10^{-4}, \eta^* = 5,26 \times 10^{-6} \text{ м}^{-1}, k_{z \text{ вр}} = 1,20 \times 10^{-2} \text{ м/сут}.$$

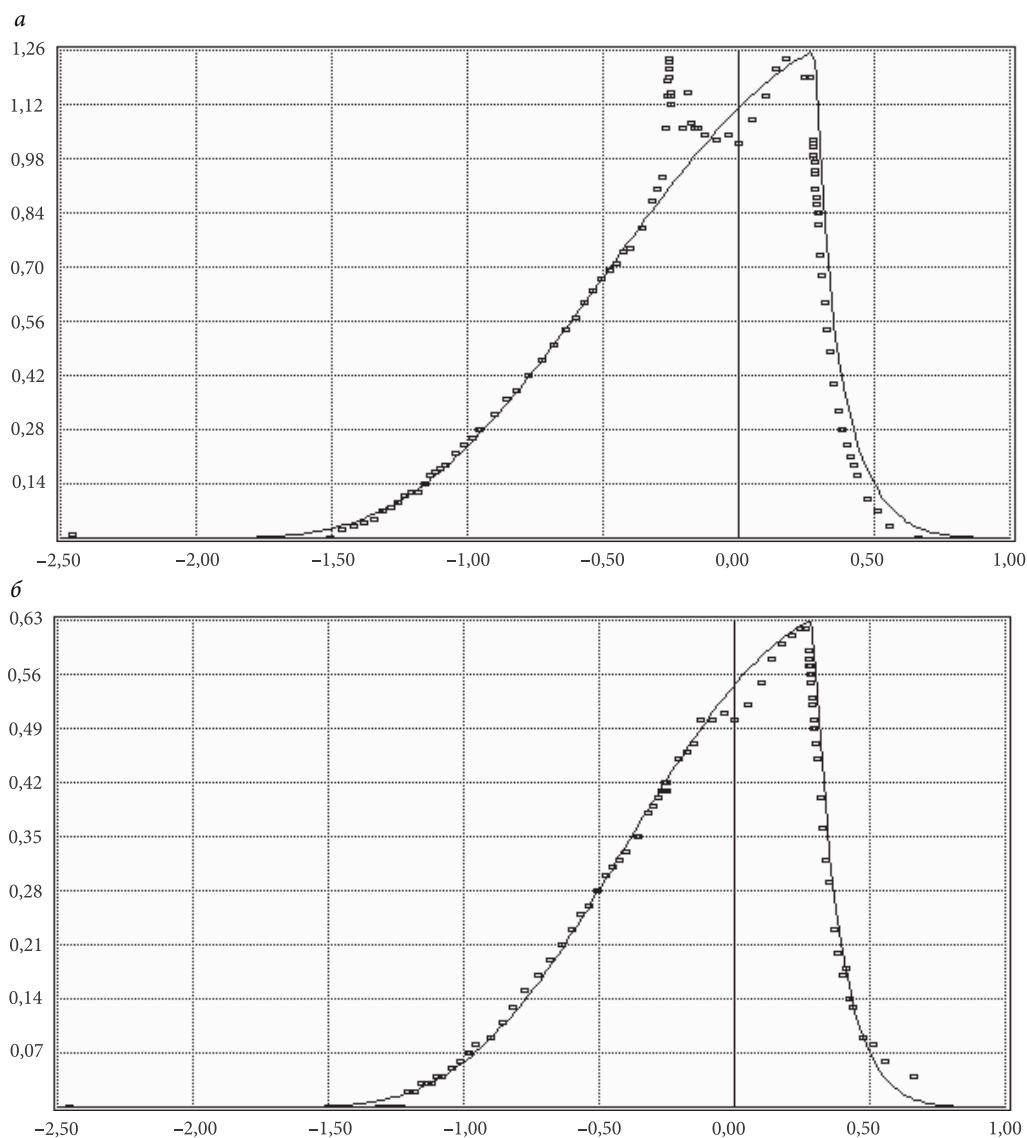


Рис. 7. Графики временного прослеживания понижения-восстановления уровня по скважинам (начало рисунка):

а — 4^п, б — 4^у, в — 5^п, г — 5^у.

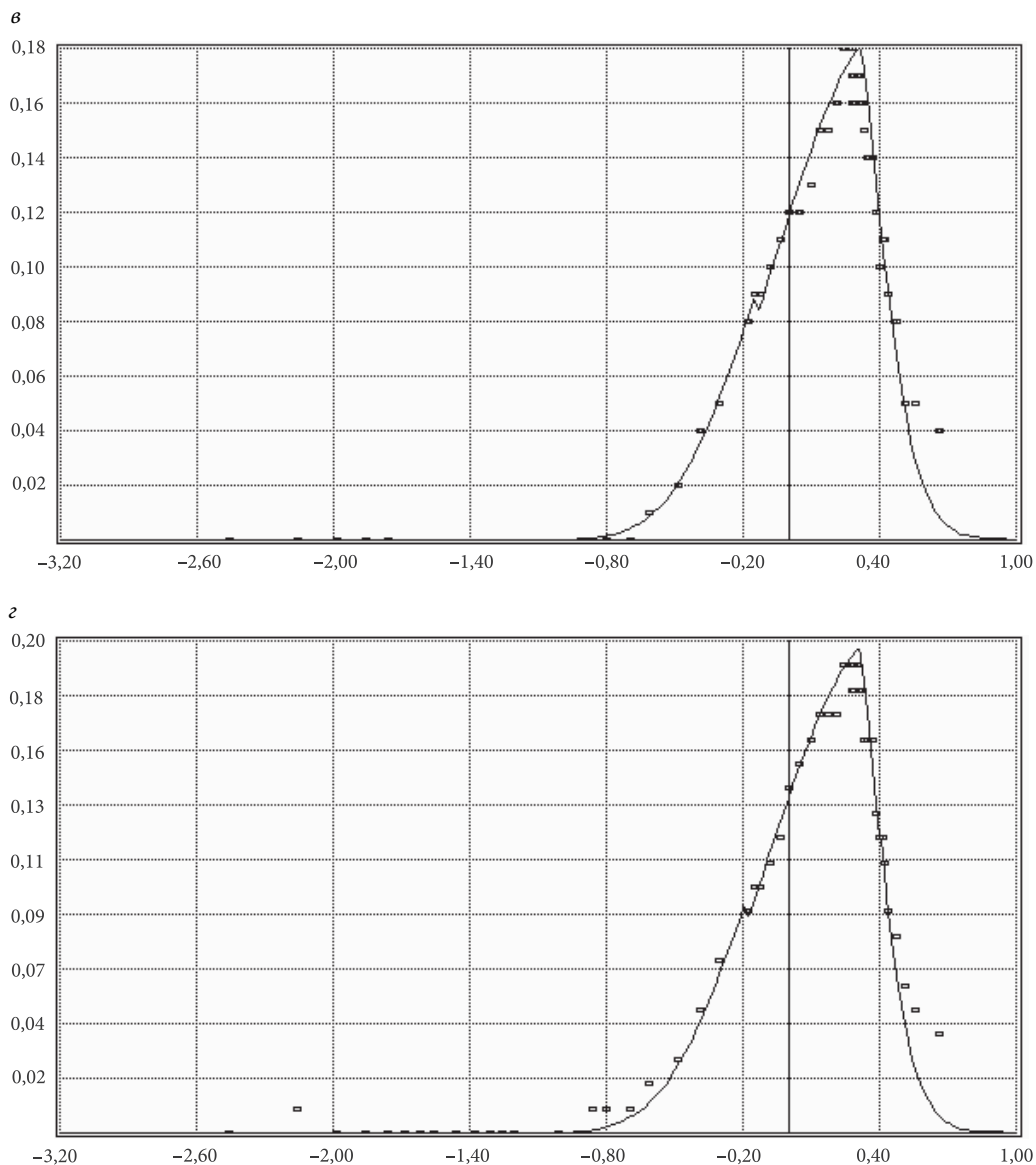


Рис. 7. Графики временного прослеживания понижения-восстановления уровня по скважинам (окончание рисунка):

$a - 4^{\text{н}}$, $b - 4^{\text{в}}$, $в - 5^{\text{н}}$, $z - 5^{\text{в}}$.

По результатам опытных работ были рассчитаны гидрогеологические параметры основных водоносных горизонтов и комплексов не только вдоль напластования, но и вкрест него (таблица). Отдельно следует отметить, что подобного рода исследования, направленные на изучение и обоснование гидрогеологических параметров верхней части гидрогеологического разреза, проведены авторами и для южной части месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова (с использованием данных опытных работ, проведенных как на стадии разведки, так и на стадии

отработки месторождения, в том числе и авторами). На основе полученных результатов была обоснована гидродинамическая схематизация района месторождения и создана численная геофильтрационная модель месторождения, на которой выполнялись прогнозные расчеты водопритоков к системам внутреннего и внешнего дренажа [1].

Осредненные значения гидрогеологических параметров по результатам обработки ОФР аналитическими методами

| Водоносные горизонты и комплексы | k_x , м/сут | k_z , м/сут | T , м ² /сут | $a^*_{x,z}$, м ² /сут | μ^* | η^* , м ⁻¹ |
|----------------------------------|---------------|---------------|---------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------------|
| $C_2\ ol-ok$ | — | — | 1500 | — | — | — |
| $C_2\ vr$ | — | 0,026 | — | — | — | — |
| $C_2\ vr+ur$ | 1,11 | — | 34 | $1,0 \times 10^4$ | $3,4 \times 10^{-3}$ | $1,1 \times 10^{-4}$ |
| $C_2\ ur$ | 1,24 | 0,044 | 34 | $1,0 \times 10^4$ | $3,4 \times 10^{-3}$ | $1,2 \times 10^{-4}$ |
| $C_2\ ur + V_2\ pd$ | 1,08 | 0,039 | 216 | $2,7 \times 10^5$ | $9,2 \times 10^{-4}$ | $4,7 \times 10^{-6}$ |
| $V_2\ pd$ | 1,13 | 0,028 | 186 | $2,2 \times 10^5$ | $8,5 \times 10^{-4}$ | $4,7 \times 10^{-6}$ |
| $V_2\ mz$ | 0,04 | 0,006 | 10 | — | — | $1,0 \times 10^{-6}$ |
| $V_2\ up$ | 0,0004 | 0,0007 | 0,06 | $5,5 \times 10^3$ | $n \times 10^{-5}$ | $3,4 \times 10^{-7}$ |
| $n\ D_3-C_2$ | 1,02 | 0,03 | 137 | $1,7 \times 10^5$ | $8,0 \times 10^{-4}$ | $2,0 \times 10^{-6}$ |
| $i\ D_3-C_2$ | 0,04 | 0,005 | 8 | $2,6 \times 10^4$ | $3,1 \times 10^{-4}$ | $1,0 \times 10^{-6}$ |
| $n+i\ D_3-C_2$ | 0,24 | 0,007 | 106 | — | — | — |

Полученные результаты (см. таблицу) легли в основу гидродинамической модели месторождения [2], на которой выполнялись расчеты водопритоков к внутришахтному водоотливу (на тот момент в качестве основного был принят подземный способ отработки месторождения) и дренажному контуру водопонижающих скважин.

Важно отметить, что при выполнении опытных работ существенную роль сыграли:

- кустовое расположение наблюдательных скважин, оборудованных фильтрами на все водоносные горизонты верхней части гидрогеологического разреза;
- возможность наблюдения за распространением возмущения во всех горизонтах на разных расстояниях, благодаря большому количеству наблюдательных скважин;
- достаточно высокий дебит (60–90 м³/ч) при откачках из наиболее проницаемого падунского водоносного комплекса, что позволяло создавать существенное возмущение в гидрогеологической системе;
- проведение нескольких групповых и кустовых откачек на разных участках месторождения.

Все это позволило провести качественную интерпретацию результатов опытно-фильтрационных работ и впервые обосновать гидродинамическую стратификацию гидрогеологического разреза для выбранного месторождения [10].

В заключение следует сказать, что в 2010 г. была завершена доразведка месторождения, а уже в 2011 г. на месторождении им. В. Гриба начались вскрышные работы.

Авторы выражают благодарность гидрогеологам Верхотинской партии (ЗАО «Архангельскгеолразведка») В.Ф.Курушину, Т.Н.Козельской и др., оказавшим большую помощь в организации и проведении полевых работ.

Литература

1. Атрощенко Ф. Г., Филин Р. А., Шкиль И. Э. Оптимизация системы осушения при разработке южной группы трубок месторождения им. М. В. Ломоносова открытым способом // Горный журнал. 2012. № 7. С. 33–37.
2. Атрощенко Ф. Г. и др. Отчет по НИР: «Прогноз гидрогеологических, инженерно-геологических и горно-геологических условий разработки алмазоносной трубки им. В. П. Гриба подземным способом». СПб.: СПб отд. Института геоэкологии РАН, 2004. 249 с.
3. Малов А. И. Подземные воды Юго-Восточного Беломорья: формирование, роль в геологических процессах. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 234 с.
4. Редкие типы минеральных вод Среднерусского артезианского бассейна / под ред. А. И. Короткова, А. А. Потапова, В. Г. Румынина. СПб.: Наука, 2013. 303 с.
5. Hantush M. S., Jacob C. E. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1955. Vol. 36, N 1. P. 95–100.
6. Хантуш М. С. Анализ данных опытных откачек из скважин в водоносных горизонтах с перетеканием // Вопросы гидрогеологических расчетов. М.: Мир, 1964. С. 27–42.
7. Hantush M. S. Hydraulics of Wells // Advances in Hydrosience. 1964. Vol. 1. P. 201–291.
8. Синдаловский Л. Н. Программная поддержка интерпретации опытно-фильтрационных работ на участках загрязнения подземных вод: автореф. дис. ... канд. геолого-минералогических наук. СПб.: Изд. СПбГИ, 1998. 20 с.
9. Мироненко В. А., Шестаков В. М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978. 325 с.
10. Филин Р. А., Потапов А. А., Атрощенко Ф. Г. Гидродинамическая стратификация гидрогеологического разреза на месторождении алмазов им. В. П. Гриба для обоснования способа захоронения шахтных вод (Архангельская область) // Сб. докладов 7-го Международного конгресса «Вода: экология и технология» ЭКВАТЭК-2006. Москва 30 мая — 2 июня 2006 г. В 2 ч. Ч. 1. С. 173–176.

Для цитирования: Филин Р. А., Потапов А. А., Атрощенко Ф. Г., Макушенко М. Е. Опыт проведения откачек в слоистых толщах (на примере Архангельской алмазоносной провинции) // Вестник СПбГУ. Серия 7. Геология. География. 2016. Вып. 3. С. 24–39. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.302

References

1. Atroshchenko F. G., Filin R. A., Shkil' I. E. Optimizatsiia sistemy osusheniia pri razrabotke iuzhnoi gruppy trubok mestorozhdeniia im. M. V. Lomonosova otkrytym sposobom [Optimization of a dewatering system during the open cast mining of a south group of pipes on Lomonosov deposit]. *Gornyi zhurnal* [Gornyi zhurnal]. Moscow, LLC "Typography Mospoligraf", 2012, no. 7, pp. 33–37. (In Russian)
2. Atroshchenko F. G. et al. Otchet po NIR: «Prognoz gidrogeologicheskikh, inzhenerno-geologicheskikh i горно-геологических условий разработки алмазоносной трубки им. В. П. Гриба подземным способом» [Scientific and Research Report: "Forecast of hydrogeological, engineering and geological, geotechnical conditions during the underground mining of V. P. Grib diamond pipe"]. St. Petersburg, St. Petersburg Branch of the Institute of Environmental Geoscience RAS Publ., 2004. 249 p. (In Russian)
3. Malov A. I. Podzemnye vody Iugo-Vostochnogo Belomor'ia: formirovanie, rol' v geologicheskikh protsessakh [The groundwater of Southeastern Belomor'ia: forming, the role in the geological processes]. Ekaterinburg: UrB RAS, 2003. 234 p. (In Russian)
4. Redkie tipy mineral'nykh vod Srednerusskogo artezianskogo basseina [Rare types of mineral waters in the Srednerusskiy artesian basin]. Ed. by A. I. Korotkov, A. A. Potapov, V. G. Rumynin. St. Petersburg, Nauka Publ., 2013. 303 p. (In Russian)
5. Hantush M. S., Jacob C. E. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Transactions, American Geophysical Union*, 1955, vol. 36, no. 1, pp. 95–100.

6. Khantush M.S. Analiz dannykh opytnykh otkachek iz skvazhin v vodonosnykh gorizontakh s peretekaniem [Analysis of data pumping tests from the wells in leaky aquifers]. *Voprosy gidrogeologicheskikh raschetov* [Issues of hydrogeological calculations]. Moscow, Mir Publ., 1964, pp. 27–42. (In Russian)

7. Hantush M. S. Hydraulics of Wells. *Advances in Hydroscience*, 1964, vol. 1, pp. 201–291.

8. Sindalovskii L.N. *Programmnaia podderzhka interpretatsii opytno-fil'tratsionnykh rabot na uchastkakh zagriazneniia podzemnykh vod*. Autoref. Dis. kand. geol.-mineral. nauk. [Software support for the interpretation of experimental-filtration works in the areas of groundwater contamination. Thesis of PhD.] St. Petersburg, SPMI, 1998. 20 p. (In Russian)

9. Mironenko V. A., Shestakov V.M. *Teoriia i metody interpretatsii opytno-fil'tratsionnykh rabot* [Theory and methods of interpretation of the experimental-filtration works]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 325 p.

10. Filin R. A., Potapov A. A., Atroshchenko F.G. Gidrodinamicheskaya stratifikatsiia gidrogeologicheskogo razreza na mestorozhdenii almazov im. V.P.Griba dlia obosnovaniia sposoba zakhoroneniia shakhtnykh vod (Arkhangel'skaia oblast') [Hydrodynamic stratification of hydrogeological cross section on V.P.Grib diamond deposit to justify the method of disposal mine drainage waters (Arkhangelsk region)]. *Sb. dokladov 7-go Mezhdunarodnogo kongressa «Voda: ekologiya i tekhnologiya» EKVATEK-2006. Moskva 30 maia — 2 iyunia 2006 g. V 2 ch.* [Collection of Reports 7th International Congress "Water: Ecology and Technology" Aquatech-2006. Part 1–2. Moscow, May 30 — June 2, 2006. Moscow, GUP MO "Kolomenskaya typography", 2006, part 1, pp. 173–176. (In Russian)]

For citation: Filin R. A., Potapov A. A., Atroshchenko F.G., Makushenko M. E. Experience of pumping tests in multilayer aquifers (Arkhangelsk diamond Province). *Vestnik SPbSU. Series 7. Geology. Geography*, 2016, issue 3, pp. 24–39. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.302

Статья поступила в редакцию 30 мая 2016 г.

Контактная информация:

Филин Роман Александрович — магистр геологии; filin@dhspb.ru

Потапов Александр Анатольевич — кандидат геолого-минералогических наук; potapov@dhspb.ru

Атрощенко Федор Григорьевич — кандидат геолого-минералогических наук; fatroschenko@mail.ru

Макушенко Мария Евгеньевна — магистр биологии; maria@hgepro.ru

Filin Roman A. — M.S; filin@dhspb.ru

Potapov Alexandr A. — PhD; potapov@dhspb.ru

Atroschenko Fedor G. — PhD; fatroschenko@mail.ru

Makushenko Mariia E. — M.S; maria@hgepro.ru